

УДК 658:556.332.52

ПЛАНУВАННЯ І МЕНЕДЖМЕНТ ГІС-ПРОЕКТІВ РЕГІОНАЛЬНОГО ДОВГОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНІВ ПІДЗЕМНИХ ВОД ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ

Л. І. Давибіда

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: davybida@yandex.ua

Удосконалено концептуальну схему обробки даних гідрогеологічного моніторингу для вирішення завдань довгострокового прогнозування природного режиму рівнів ґрунтових вод на основі геоінформаційного підходу. Результатом запропонованого алгоритму є створення ГІС-моделей, які дають змогу ефективно відображати гідрогеологічні умови досліджуваних регіонів для їх вивчення і аналізу, здійснювати підготовку вхідних даних для математичних моделей, візуалізацію і аналіз результатів моделювання. Описано основні етапи проектування первинного геоінформаційного забезпечення моніторингу рівнів підземних вод. Проведено аналіз доцільності застосування систем автоматизації управління проектами в задачах проектування даного геоінформаційного забезпечення. Розроблено структуру робіт ГІС-проекту прогнозного моделювання рівнів ґрунтових вод з урахуванням концептуального алгоритму дослідження і прогнозування багаторічних закономірностей природного гідрогеодинамічного режиму. В середовищі системи автоматизації управління проектами Microsoft Project на основі засобів календарно-сіткового планування складено календарний план робіт. Засоби календарно-сіткового планування дають змогу виконати структурування складного ГІС-проекту і скласти календарний план для подальшого ефективного проектування, тестування, впровадження і експлуатації геоінформаційної системи.

Ключові слова: гідрогеодинамічний режим, довгостроковий прогноз, управління проектами, геоінформаційні моделі, діаграма Ганта.

Усовершенствована концептуальная схема обработки данных гидрогеологического мониторинга для решения задач долгосрочного прогнозирования природного режима уровней грунтовых вод на основе геоинформационного подхода. Результатом предложенного алгоритма является создание ГИС-моделей, которые позволяют эффективно отображать гидрогеологические условия исследуемых регионов для их изучения и анализа, осуществляют подготовку исходных данных для математических моделей, визуализацию и анализ результатов моделирования. Описаны основные этапы проектирования первичного геоинформационного обеспечения мониторинга уровней подземных вод. Проведен анализ целесообразности применения систем автоматизации управления проектами в задачах проектирования данного геоинформационного обеспечения. Разработана структура работ ГИС-проекта прогнозного моделирования уровней грунтовых вод с учетом концептуального алгоритма исследования и прогнозирования многолетних закономерностей природного гидрогеодинамического режима. В среде системы автоматизации управления проектами Microsoft Project на основе средств календарно-сетевое планирования составлен календарный план работ. Средства календарно-сетевое планирования позволяют выполнить структуризацию сложного ГИС-проекта и составить календарный план для дальнейшего эффективного проектирования, тестирования, внедрения и эксплуатации геоинформационной системы.

Ключевые слова: гидрогеодинамический режим, долгосрочный прогноз, управление проектами, геоинформационные модели, диаграмма Ганта.

The conceptual scheme of the hydrogeological monitoring data to solve the problem of long-term forecasting of groundwater level natural mode based on the geoinformation approach was improved. The result of the proposed algorithm is to develop GIS models allowing to effectively reflect the hydrogeological conditions of the studied regions for their study and analysis, to prepare input data for mathematical models, to produce visualization and analysis of the simulation results. The design basic stages of the primary geoinformation support of monitoring of groundwater levels were described. The analysis of the appropriateness of project management automation in problems of the geoinformation software design was made. The structure of the work of the GIS-project of predictive modeling of groundwater levels was developed according to the conceptual algorithm of research and prediction of the long-term regularities of natural hydrogeodynamic mode. The project work plan was compiled on the basis of the calendar and network planning resources in the software environment of the project management automation system Microsoft Project. Tools of calendar-network planning allow to make complex GIS-project structuring and create work schedules for further efficient design, testing, implementation and operation of the geographic information system.

Keywords: hydrogeodynamic mode, long-term forecast, project management, geoinformation model, Gantt chart.

Вступ

Підземні води є найбільш динамічною і найменш захищеною від антропогенного впливу складовою геологічного середовища. Вивчення і прогнозування природного режиму рівнів підземних вод є актуальною науково-

прикладною проблемою, що зумовлена недостатньою забезпеченістю України водними ресурсами і розвитком негативних екзогенних геологічних процесів, пов'язаних з діяльністю підземних вод. Особливої уваги заслуговують ґрунтові води, які характеризуються інтенсив-

ним водообміном і найбільш тісним зв'язком із зовнішніми чинниками формування, живлення та розвантаження підземних вод. Оскільки гідрогеодинамічний режим є складним багатовимірним процесом, його, особливо на регіональному рівні досліджень, слід розглядати у якості складної, динамічної у просторі і часі системи, ефективно вивчення і прогнозування стану якої можливі лише при використанні сучасних геоінформаційних технологій.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Прогноз режиму підземних вод – це науково обгрунтоване ймовірнісне судження про можливий кількісний та якісний стан гідрогеологічного об'єкта в майбутньому. Результати попередніх досліджень [1-6] свідчать, що природний режим рівня підземних вод є інтегральною функцією режимоутворювальних чинників, і проявляється з певною інерційністю по відношенню до мінливості останніх. Тому при складанні просторово-часових гідрогеологічних прогнозів необхідно враховувати закономірності режиму підземних вод і зміни режимоутворювальних чинників із використанням комплексних методів.

На даний час прогнози рівнів ґрунтових вод для території України складаються із завчасністю до 1 року і базуються на використанні кореляційних зв'язків рівнів із широким комплексом режимоутворювальних чинників та наступним розрахунком багатфакторних моделей [7]. При складанні прогнозів і проведенні гідрогеологічних оцінок території України використовується програмний пакет «АСПА» (Автоматична система аналізу і прогнозу), розроблений в Центрі моніторингу підземних вод ДВ УкрДГРІ. Програмний пакет працює в комплексі з базою даних «ГГІС» (Галузевої геологічної інформаційної системи), де зберігаються всі необхідні дані для складання прогнозів і побудови прогнозних моделей. Кожен прогноз супроводжується схематичними картами розподілу рівнів ґрунтових вод у коефіцієнтах відносного положення, відповідно до районування території України за особливостями формування ґрунтових вод [7]. Дане програмне забезпечення використовується при складанні сезонних прогнозів для національного рівня досліджень.

Методику використання інструментальних і спеціалізованих геоінформаційних систем для вирішення задач моніторингу ґрунтових вод із застосуванням вбудованих програмних модулів геостатистичного аналізу задекларовано у роботі [8]. Апробація запропонованої методики здійснена для території Дніпропетровської області на базі програмного пакету ArcGis.

Розробці методології моніторингу гідрогеодинамічної складової геологічного середовища урбанізованих територій на основі геоінформаційного підходу присвячені роботи науковців Київського національного університету імені Тараса Шевченка [9-14]. Авторами виконана оцінка сучасного стану застосування гео-

інформаційних технологій при вирішенні гідрогеологічних завдань, доведена доцільність і необхідність використання геоінформаційних систем (зокрема ArcGis і MapInfo Professional) при збиранні, обробці і збереженні інформації для створення гідрогеологічних математичних моделей та просторового аналізу. На базі геоінформаційного піходу розроблені нова методологія моніторингу гідрогеодинамічної складової геологічного середовища та методичні основи використання ГІС для математичного моделювання потоків ґрунтових вод урбанізованих територій. Ефективність запропонованої методології доведена на прикладах типових ділянок території м. Києва.

Слід зауважити існуючий досвід створення казахськими вченими на базі програмного забезпечення MapInfo Professional аналітичної геоінформаційної системи для моделювання і прогнозування стану водних ресурсів басейну Аральського моря для вирішення актуальної проблеми забезпечення населення якісною питною водою [15]. ГІС побудована з урахуванням принципу стадійності гідрогеологічних досліджень. Її геоінформаційною основою є дрібномасштабні геологічні, гідрогеологічні, гідрологічні, кліматичні карти досліджуваної території басейну Аральського моря. Система є відкритою для подальших доповнень і деталізації і застосовується для вирішення завдань відображення гідрогеологічних умов досліджуваних регіонів для їх вивчення і аналізу, підготовки вхідних даних для математичних моделей, відображення і аналізу результатів моделювання.

Висвітлення невирішених раніше час-тин загальної проблеми

Аналіз існуючих досліджень у сфері гідрогеологічного прогнозування свідчить, що проблема складання достовірних довгострокових регіональних прогнозів природного режиму рівнів ґрунтових вод залишається невирішеною. Дослідники даної тематики відзначають багатфакторність багаторічного природного гідрогеодинамічного режиму, визначаючи його як інтегральну функцію впливу комплексу динамічних режимоутворювальних чинників, який проявляється у специфічних умовах формування режиму. Багаторічна мінливість рівнів ґрунтових вод характеризується наявністю циклічних коливань, пов'язаних зі зміною умов живлення і розвантаження у багаторічному плані, відповідно до динаміки режимоутворювальних чинників. Такі особливості формування багаторічного природного режиму рівнів обумовлюють доцільність використання для його аналізу і прогнозування комплексу ймовірно-статистичних (кореляційних і гармонійних) методів. Для врахування просторової неоднорідності режимоутворювальних умов і чинників, а також вирішення завдання екстраполяції результатів прогнозування, отриманого для локального пункту спостереження, на оточуючі території є необхідним проведення просторового аналізу з використанням геоінформаційних технологій. Як стверджується в роботі

[9], геоінформаційний підхід до вирішення гідрогеологічних завдань передбачає використання ГІС при збиранні, обробці і збереженні інформації для створення гідрогеологічних математичних моделей та просторового аналізу в ГІС. Застосування ГІС-технологій для вирішення завдань оцінки багаторічної мінливості рівнів ґрунтових вод і її довгострокового прогнозування є інформаційною базою гідрогеологічного моделювання, яка значно розширює його можливості та підвищує ефективність.

Завдання та методи досліджень

Метою даної публікації є аналіз актуальної проблеми проектування аналітичної ГІС довгострокового регіонального прогнозування природного гідрогеодинамічного режиму на основі сучасних технологій планування і управління проектами. Для досягнення зазначеної мети в ході дослідження вирішено наступні завдання:

1) удосконалення алгоритму дослідження і прогнозування багаторічних закономірностей природного гідрогеодинамічного режиму на основі ймовірнісно-статистичного і геоінформаційного підходів та з використанням методів інформаційного аналізу, математичного і картографічного моделювання з використанням ГІС-технологій;

2) виділення основних етапів проектування аналітичної ГІС просторово-часового прогнозування природного режиму рівнів підземних вод;

3) розроблення календарного плану передпроектних досліджень аналітичної ГІС регіонального гідрогеологічного прогнозування засобами системи автоматизації управління проектами Microsoft Project.

Основний матеріал досліджень

Реалізація ГІС-проектів, як правило, займає дуже багато часу і включає в себе кілька етапів [16-18]:

- передпроектні дослідження, які передбачають вивчення вимог користувачів і функціональних можливостей програмних засобів ГІС, що використовуються, техніко-економічне обґрунтування, оцінку співвідношення «витрати»/«прибуток»;
- системне проектування ГІС, яке включає стадію пілот-проекту, розробку ГІС, її тестування на невеликому територіальному фрагменті або створення дослідного зразка;
- впровадження (реалізація) ГІС;
- експлуатація і використання.

Отже, проектування будь-якої ГІС включає в себе планування робіт та досліджень, створення та наповнення баз геоданих, а також обробку та аналіз просторових даних із використанням геоінформаційних технологій.

У відповідності до сучасної методології планування і управління ГІС-проектами важливою передумовою створення успішної системи є розробка концептуальної схеми обробки вхідних даних.

Основним засобом вивчення, оцінки і прогнозу режиму підземних вод в Україні є багато-

річні стаціонарні режимні спостереження за елементами гідрогеологічного режиму, які здійснюються виробничими підрозділами за допомогою мережі спостережних пунктів. Показники параметрів режиму рівня по кожному пункту за весь період спостережень у хронологічному порядку формуються у вигляді часових рядів, зручних для подальшого аналізу та розрахунків. Достатньо загальною математичною (статистичною чи ймовірнісною) моделлю часового ряду служить модель виду

$$Y_t = f(t) + u_t, \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (1)$$

У даній моделі спостережуваний ряд y_1, y_2, \dots, y_T , під яким розуміють спостереження досліджуваної змінної у T рівнорозділені моменти часу, розглядається як сума деякої повністю детермінованої послідовності $f(t)$, яку можна назвати систематичною складовою, і випадкової послідовності u_t , яка підпорядковується деякому випадковому закону [19-20]. При проведенні аналізу рядів динаміки рівнів ґрунтових вод можливі різні варіанти математичної моделі (1), в яких вплив часу може проявлятися або тільки на функції чи послідовності $f(t)$, або тільки на ймовірнісному процесі, що визначає випадкову складову u_t , або на обох цих компонентах. Це зумовлено багатофакторністю гідрогеодинамічного режиму, що, як вже зазначалося, формується під впливом комплексу природних і штучних, взаємодіючих між собою чинників, а також залежить від особливостей умов формування, що індивідуалізують режим окремо взятих ділянок. Питання щодо вибору математичної моделі ряду і застосування тих чи інших методів аналізу слід вирішувати у кожному конкретному випадку залежно від характеру фактичних даних.

Для прогнозу елементів режиму рівнів ґрунтових вод по окремих спостережних пунктах найчастіше використовуються ймовірнісно-статистичні методи (кореляційні гідрометеофакторні, екстраполяція гармонічних складових, автокореляційні і марківські процеси). Ці методи визначають як основні при проведенні різного роду гідрогеологічних оцінок і складанні прогнозів режиму підземних вод перших від поверхні горизонтів, що знаходяться у природних і слабопорушених умовах. Їх використання поширюється також на пластові водоносні горизонти у тому випадку, коли вони є першими від поверхні і, за умов відсутності витриманих водотривів, мають гідравлічний зв'язок із ґрунтовими водами.

Важливим є те, що самі режимоутворювальні чинники не тільки залежать один від одного, але й змінюються під впливом інших, більш регіональних чинників, таких як сонячна активність, атмосферна циркуляція тощо. Така багатофакторна природа коливань рівня дає підставу розглядати рівень будь-якого періоду як випадковий, а хронологічну послідовність спостережень по свердловині, де вивчається природний режим рівнів ґрунтових вод, представити як статистичну вибірку, що дає можливість на основі емпіричного матеріалу робити висно-

вки про майбутні ймовірні значення досліджуваного елемента.

Необхідною умовою для застосування ймовірно-статистичних методів є наявність достатньо тривалих рядів спостережень (не менше 25-30 значень на елементи, що прогножуються, і режимоутворювальні чинники) та впевненість, що весь набір чинників, які обумовлюють режим ґрунтових вод у період проведення спостережень, збережеться і на прогнозований період часу [6].

Для прив'язки ймовірно-статистичної моделі до визначеного часу використовуються графіки, які відображають хронологічні закономірності ходу елементів режиму, попередньо переведених у зручні коефіцієнти забезпеченості (відносності) – P (коефіцієнт відносного положення рівня). Розрахунки забезпеченості здійснюються з використанням ймовірнісних сіток, шляхом інтегрування нормованої функції нормального розподілу, або за наближеною формулою

$$P = \frac{m - 0,5}{n} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де m – порядковий номер члена,

n – загальна кількість членів ряду [3-5].

Як початкові дані для одержання узагальненої інформації використовуються результати спостережень по окремих пунктах гідрогеологічного моніторингу.

Для реалізації ефективної методики довгострокового прогнозування гідрогеодинамічного режиму із подальшим уточненням схем гідрогеологічного районування з урахуванням територіальної синхронності режиму необхідно виконати комплексний аналіз існуючих даних моніторингу багаторічної динаміки рівнів ґрунтових вод та чинників, що її обумовлюють. Представлена на рис. 1 концептуальна схема обробки вхідних даних [21], побудована на базі універсального алгоритму прогнозування екзогенних геологічних процесів, запропонованого Е.Д. Кузьменком [22], з урахуванням сучасних уявлень про механізм формування природного гідрогеодинамічного режиму як природно-історичного процесу циклічної мінливості рівнів підземних вод у часі і в межах визначеного простору, що відбувається під впливом сукупності певних взаємодіючих постійно змінних природних чинників, і полягає у послідовній реалізації нижчеподаних етапів.

Перший етап запропонованого алгоритму є підготовкою (створенням і оптимізацією) баз даних режимних спостережень для подальшого аналізу багаторічних закономірностей формування гідрогеодинамічного режиму під впливом комплексу природних чинників і їх екстраполяції на перспективу.

При реалізації етапу вирішуються проблеми відбору репрезентативних пунктів спостережень для моделювання і довгострокового прогнозування природного режиму, а також встановлення однорідності багаторічної мінливості рівнів ґрунтових вод у межах досліджуваних територій.

На початковому етапі досліджень також є доцільною перевірка рівномірності розподілу спостережних точок на досліджуваній території, оскільки відповідність їх розподілу випадковій схемі розташування забезпечує рівномірність та незалежність випробувань і дозволяє обґрунтовано застосовувати статистичні моделі випадкових величин для дослідження просторово-часової мінливості режиму рівнів підземних вод.

Зрозуміло, що часові прогнози повинні складатися для ділянок із синхронним гідрогеологічним режимом. Тому при вирішенні задачі довгострокового регіонального прогнозування основною метою районування території є виокремлення ділянок, у межах яких подібність у коливаннях рівня ґрунтових вод у свердловинах досягає ступеня, який дозволяє по свердловині-аналогу скласти достовірне уявлення про хід змін рівня для будь-якого пункту цієї ділянки. Для об'єктивного аналізу багаторічних змін рівня ґрунтових вод і встановлення територіальної однорідності при гідрогеологічному районуванні, прогнозуванні та виявленні просторових закономірностей гідрогеодинамічного режиму необхідне застосування кількісних методик оцінки, перш за все – кореляційного аналізу зв'язків мінливості рівнів і режимоутворювальних чинників, що її зумовлюють [2-6].

Для об'єктивного аналізу багаторічних змін рівня ґрунтових вод і встановлення територіальної однорідності А.А. Коноплянцевим в роботі [5] було запропоновано кількісну методику оцінки, яку, на нашу думку, доцільно застосовувати при гідрогеологічному районуванні, прогнозуванні та виявленні територіальних закономірностей режиму ґрунтових вод. У якості характеристики синхронності змін рівня ґрунтових вод виступає коефіцієнт кореляції між фазооднорідними рівнями у свердловинах, які розташовані на різних відстанях одна від одної. Критична величина коефіцієнта кореляції, яка дозволяє вважати режим ґрунтових вод порівнюваних пунктів однорідним, визначається за допомогою кількісних критеріїв.

Для встановлення ймовірності того, що коефіцієнт кореляції r є статистично значущим і не випадковим чином відрізняється від 0, у математичній статистиці використовують метод Р.А. Фішера. Для гідрогеологічних оцінок і прогнозів при тривалості режимних спостережень 20-25 років А.А. Коноплянцевим запропоновано приймати ймовірність випадковості $P = 1\%$ [5]. Така ймовірність має місце при

$$z = 1,15 \lg \frac{1 + |r|}{1 - |r|} \sqrt{N - 3} \geq 2,5, \quad (3)$$

де z – критерій Фішера;

N – число членів сукупності.

Методика А.А. Коноплянцева дозволяє виділити групи свердловин-аналогів. Для зонування території для множини свердловин виконується побудова полігонів Вороного-Тіссена у межах досліджуваних регіонів. Цей метод дозволяє визначити геометричну сукупність точок, відстань яких до конкретної точки менша,

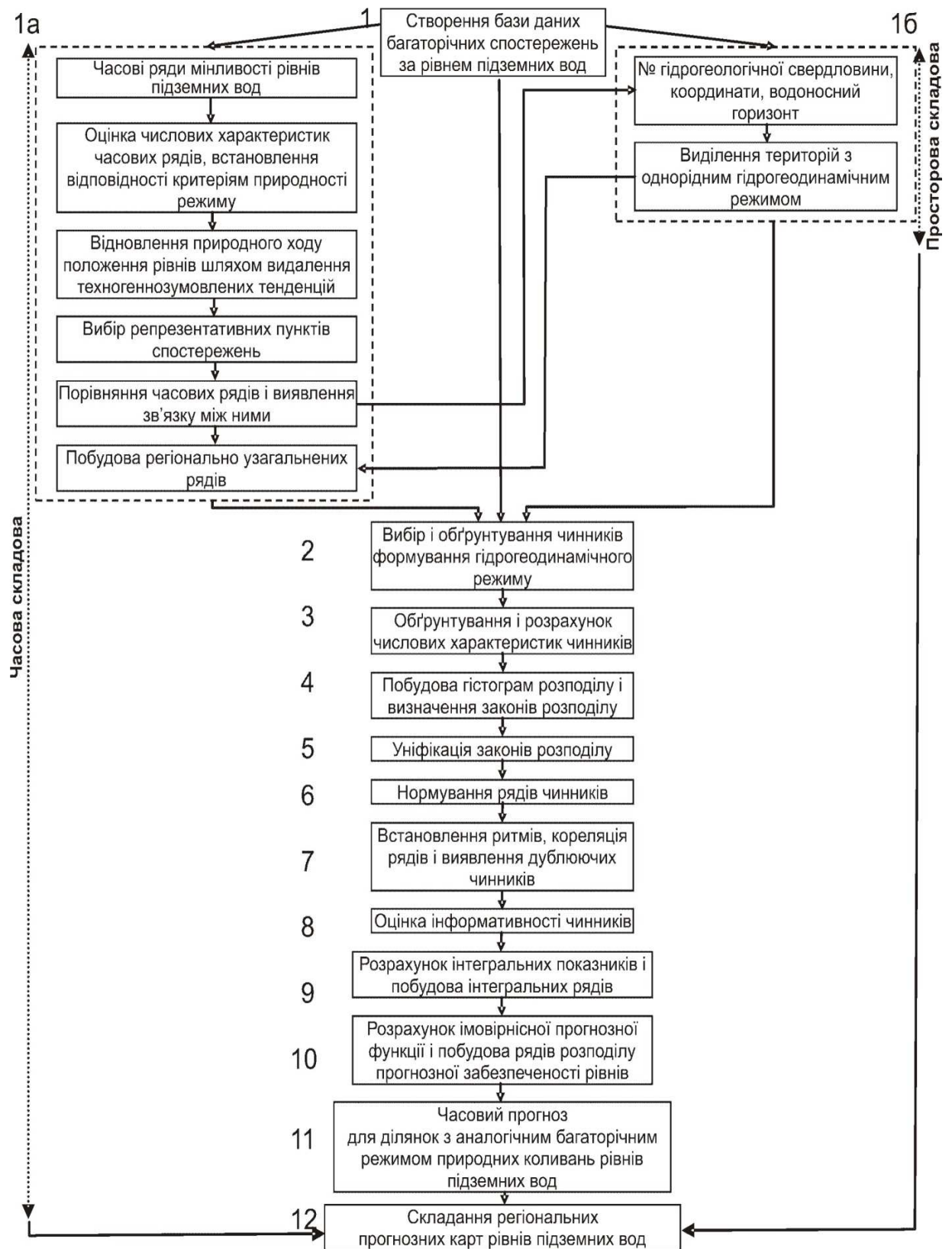


Рисунок 1 – Алгоритм дослідження і прогнозування багаторічних закономірностей природного гідрогеодинамічного режиму

ніж відстань до будь-якого іншої. Полігони Тіссена-Вороного, побудовані для точок із аналогічним режимом, об'єднуються. Таким чином, виділяємо зони, які з найбільшою вірогідністю характеризуються однорідними гідрогео-

логічними умовами і впливом режимоутворювальних чинників. Початкову робочу карту отримуємо з урахуванням зонування територій за ступенем зволоження і конфігурації гідрографічної мережі.

Для виділених, умовно однорідних за багаторічним природним режимом рівнів ґрунтових вод, районів розраховуються узагальнені ряди мінливості положення рівня шляхом розрахунку осереднених, нормованих за середньоквадратичним відхиленням, значень для груп спостережних свердловин із синхронними багаторічними коливаннями рівнів. При недостатній інформації як узагальнений приймається хронологічний хід розподілу нормованих значень ряду за даними репрезентативного спостережного пункту. Результатом осереднення вихідних рядів є також певне їх згладжування, що дозволяє частково усунути вплив випадкової складової («шуму»). Регіонально узагальнені ряди є початковими даними для складання регіональних довгострокових прогнозів положення рівня ґрунтових вод.

Комплекс чинників формування багаторічного гідрогеодинамічного режиму вибирається з наступних міркувань: забезпечення представництва всіх груп чинників; залежність забезпеченості рівня від розподілу і динаміки характеристик чинників; розподіл чинників підпорядковується одному зі статистичних законів; чинники виключають одноразовий значний вплив один на одного; ритми часових чинників узгоджуються з ритмами багаторічного ходу положення рівня підземних вод; значимість впливу чинників на формування багаторічного режиму рівнів приблизно однакова; чинники є об'єктивними, відповідають регіональному рівню та є загальнодоступними для користувача. Таким чином здійснюється системний підхід. Не враховуються чинники, зміна яких є короткостроковою, або відповідає локальному рівню вивчення режиму підземних вод. Типовий перелік груп часових режимоутворювальних чинників: космічні, метеорологічні, гідрологічні, сейсмічні [1-6, 21, 22].

Обґрунтування вибору кількісних характеристик чинників формування режиму здійснюється за наступними критеріями:

1) наявність літературних даних про зв'язок між режимом підземних вод та певною числовою характеристикою окремого чинника формування режиму;

2) наші уявлення про можливість такого зв'язку з точки зору фізики явища.

Часові ряди мінливості рівнів ґрунтових вод і режимоутворювальних чинників для довгострокового прогнозу (>10 років) будуються з річним кроком.

Закон розподілу визначається відповідно до гістограми розподілу характеристик режимоутворювальних чинників території досліджень, на якій по ординаті відкладається частота прояву, а по абсцисі – кількісна характеристика режимоутворювального чинника.

Аналіз літературних джерел і досвід довгострокового прогнозування активізації екзогенних геологічних процесів [1-6, 21, 22] свідчать про відповідність гістограм фактичних розподілів числових характеристик природних режимоутворювальних чинників наступним теоретичним законам розподілу: нормальному,

логнормальному, екстремальному, експоненціальному, гамма-закону. Найбільш часто зустрічається відповідність величин нормальному чи логнормальному законам. Відхилення фактичних розподілів від нормального теоретичного закону свідчить про нерівномірний вплив зовнішніх чинників, що формують величини числових характеристик, тобто про залежність цих величин як від первинних, так і похідних чинників впливу.

Уніфікація законів розподілу характеристик режимоутворювальних чинників здійснюється таким чином, щоб розподіли ймовірності перетворених величин відповідали нормальному теоретичному закону. Для цього достатньою є процедура логарифмування числових характеристик режимоутворювальних чинників, розподіли яких відповідають логнормальному закону

Процедура нормування має за мету трансформацію числових характеристик чинників, виражених у фізичних величинах, одержаних із аналізу рядів їх розподілу (міліметр суми опадів, м³/с витрат річкових вод, джоуль енергії землетрусів т. ін.) у безрозмірні показники, з якими далі можна проводити математичні операції. Зазначене нормування кожного з досліджуваних чинників зводиться до розрахунку рядів динаміки числових характеристик режимоутворювальних чинників (T_{ij}), нормованих за середньоквадратичними відхиленнями:

$$T_{ij}^{норм} = \frac{T_{ij} - \bar{T}_j}{\sigma_j}, \quad (4)$$

де $T_{ij}^{норм}$ – нормоване значення j -ї числової характеристики режимоутворювального чинника в i -му році;

T_{ij} – значення j -ї числової характеристики режимоутворювального чинника в i -му році;

σ_j – середньоквадратичне відхилення для j -ї числової характеристики режимоутворювального чинника.

На даний час перспективними вважаються часові прогнози, засновані на уявленнях про закономірну повторюваність (циклічність) природних явищ, в тому числі багаторічних коливань рівнів ґрунтових вод, на території Земної кулі чи окремих її частин. У роботах [1-3] доведено існування багаторічної циклічності у коливаннях рівнів підземних вод та її зв'язок з окремими чинниками для окремих територій, проте аналізу узагальненого впливу чинників на формування гідрогеодинамічного режиму на рівні встановлених універсальних закономірностей у цих роботах немає.

Визначення основних періодів квазігармонійних часових коливань рівнів підземних вод, а також чинників, які їх зумовлюють, тобто встановлення ритмів, слід виконувати за допомогою автокореляційного аналізу. Розрахунок автокореляційних функцій (5) дає змогу в більшості випадків виявити періоди, що відповідають основним гармонікам.

$$R_f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t-\tau)dt, \quad (5)$$

де функція $f(t)$ (часовий ряд динаміки рівнів) інтегрується у добутку з комплексно спряженою та зміщеною на певний час τ функцією $f(t)$.

За необхідності виявлення всіх гармонік та оцінки їх внеску в формування коливань виконують спектральний аналіз Фур'є. Тригонометричний ряд Фур'є – це представлення функції $f(t)$, що спостерігається на інтервалі $[0, T]$ у вигляді ряду

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t)), \quad (6)$$

де a_0, a_k, b_k – коефіцієнти функції $f(t)$;

$\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$ ($k=1, 2, \dots$) – частоти гармонік, які беруть участь у відображенні.

Підтвердження значущості чинників і виявлення серед них дублюючих з метою виключення останніх із розрахунків виконується шляхом побудови дендрограми відстаней $(1-R_{xy})$ між окремими чинниками.

Розрахунок, побудова й аналіз функцій взаємної кореляції (7) дають змогу встановити зв'язок ритмів коливань рівнів і мінливості числових характеристик режимоутворювальних чинників, а також оцінити величини зміщень у часі окремих чинників з метою досягнення синфазності основних гармонік усіх рядів, які були проаналізовані.

$$r_{xy}(k) = \frac{c_{xy}(k)}{s_x s_y} \quad \text{для } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

де $c_{xy}(k)$ – коефіцієнт крос-кореляції на лази k , s_x, s_y – стандартні відхилення рядів.

При цьому припускається відставання по фазі багаторічної мінливості рівнів ґрунтових вод порівняно з чинниками, що її зумовлюють. Синфазність досягається шляхом зміщення рядів чинників на величину випередження ряду мінливості рівнів ґрунтових вод.

Розрахунок матриці коефіцієнтів кореляції є проміжним етапом, який дає можливість пересвідчитись додатково про очікуваний знак кореляційного зв'язку між чинниками та рівнями ґрунтових вод. Зрозуміло, що чим більше r_{xy} , тим сильнішим є лінійний статистичний зв'язок між масивами x і y . Інформативність чинника визначається статистичною значимістю кореляційного зв'язку між рядом його часового розподілу і рядом динаміки рівня ґрунтових вод. Кореляційний зв'язок вважається значимим, якщо коефіцієнт кореляції у 3-4 рази перевищує величину середньої квадратичної похибки.

Чинники, що характеризуються незначимим зв'язком із багаторічною мінливістю рівня, мають низьку інформативність і з розгляду виключаються. Тіснота кореляційного зв'язку з

мінливістю рівнів для кожної з числових характеристик повинна бути приблизно однаковою, що свідчить про рівноцінність чинників у формуванні гідрогеодинамічного режиму, принаймні жоден з них не повинен домінувати.

Інтегральний показник числових характеристик чинників є параметром, який містить інтегральну інформацію щодо дії всіх режимоутворювальних чинників.

Оцінка суми часових чинників, що формують конкретні елементи гідрогеодинамічного режиму, зокрема – рівні, визначається за функцією інтегрального показника часових чинників:

$$T_i = \sum_{j=1}^m T_{ij}^{\text{норм}}, \quad (8)$$

де $T_{ij}^{\text{норм}}$ – нормовані значення j -ої числової характеристики режимоутворювального чинника,

m – кількість характеристик режимоутворювальних чинників,

i – рік спостережень.

Інакше цю суму можна назвати інтегральною функцією впливу чинників формування режиму рівнів ґрунтових вод. У загальному випадку j -й числовій характеристиці присвоюється знак «плюс» по прямій кореляції із рівнем підземних вод і «мінус» – за умови оберненої кореляції.

Розподіл інтегрального показника T_i ілюструється часовим рядом цього показника. Сумування відбувається для синхронізованих (сумішених) рядів.

Об'єктивно кількісною оцінкою режиму рівнів є ймовірність появи того, чи іншого рівня, тобто його забезпеченість, визначення якої виконується шляхом розрахунку еталонного ймовірнісного ряду. Ряди прогнозованої забезпеченості рівнів ґрунтових вод будуються на основі розрахованих даних інтегральних показників. Розрахунок еталонного ймовірнісного ряду $f(t_i)$ – це задача встановлення ймовірнісної закономірності мінливості положення рівнів ґрунтових вод під дією часових чинників на кількісному рівні, яка вирішується відповідно до методики, наведеної у [23]. При цьому враховується, що інтегральний показник T_i обчислюється як сума m нормованих за середньоквадратичним відхиленням числових характеристик режимоутворювальних чинників. Математичне очікування для такого ряду рівне 0. Дисперсія суми випадкових некорельованих величин (у даному випадку – числових характеристик режимоутворювальних чинників) обчислюється за формулою

$$D = \sum_{i=1}^m D_i. \quad (9)$$

Оскільки величини нормовані відносно стандарту, дисперсія кожного з чинників дорівнює одиниці, тоді $D = m$, середньоквадратичне відхилення ряду інтегрального показника

$\sigma = \sqrt{m}$. Значення еталонного ряду обчислюємо як

$$t_i = \frac{T_i}{\sqrt{m}}. \quad (10)$$

У такому випадку функція розподілу еталонного часового інтегрального показника описує криву нормованого нормального закону

$$f(t_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_i^2}{2}}. \quad (11)$$

Забезпеченість рівня $P(t_i)$ визначається як ймовірність відхилення t_i від свого математичного очікування шляхом інтегрування функції $f(t_i)$, тобто з використанням функції Лапласа

$$P(t_i) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t_i^2}{2}} dt. \quad (12)$$

Для складання довгострокових прогнозів мінливості рівня підземних вод та його відповідної забезпеченості реалізуються процедури продовження (екстраполяції) часових рядів. Оскільки на даний час не існує загальноприйнятої процедури прогнозування геологічних процесів, продовження рядів доцільно проводити різними способами, які успішно застосовувались при прогнозуванні активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів у роботах [23], і кожен з яких має свої переваги і недоліки при прогнозуванні режиму рівнів ґрунтових вод: за допомогою функції прогнозування predict у середовищі MathCAD, із використанням аналізу Фур'є (продовженням ряду з урахуванням всіх гармонічних складових, одержаних перетворенням Фур'є, і виділенням та екстраполяцією складових із найбільшим енергетичним внеском у загальну суму), за допомогою штучних нейронних мереж.

Оцінювання якості запропонованої методики прогнозування проводиться у відповідності до прийнятих критеріїв надійності гідрогеологічних прогнозів [2, 6]. За ймовірну помилку отриманих прогнозів приймається довірчий інтервал, який визначається з урахуванням оцінки перевірочних прогнозів:

$$R = \frac{S_y \cdot t(\gamma, k)}{\sqrt{k}}, \quad (13)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y_i^{\phi} - y_i^n)^2}{k}}, \quad (14)$$

де R – радіус довірчого інтервалу;

S_y – середньоквадратична похибка перевірочних прогнозів;

y_i^{ϕ} – фактичні значення положень рівня;

y_i^n – прогнозні значення положень рівня;

k – кількість перевірочних прогнозів;

$t(\gamma, k)$ – таблична величина функції розподілу Ст'юдента.

Для оцінки ефективності прогнозів (якості методики) застосовують кореляційне відношення, яке характеризує ступінь відхилення прогнозних значень від фактичних [2, 6]

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{S_y^2}{\sigma_y^2}}, \quad (15)$$

де σ_y – середнє квадратичне відхилення прогнозованої величини від норми.

Враховуючи існуючий досвід гідрогеологічного прогнозування [1-7], правомірно використовувати шкалу оцінки точності методики прогнозування залежно від значення ρ : $\geq 0,9$ – «відмінна»; $\geq 0,8$ – «добра»; $\geq 0,6$ – «задовільна»; $< 0,6$ – «незадовільна».

Результатом реалізації запропонованої методики є як часові ряди прогнозованої забезпеченості для виділених ділянок із однорідним гідрогеодинамічним режимом, так і прогнозні регіональні карти, які характеризують забезпеченість рівня ґрунтових вод у просторі і в часі.

Даний алгоритм дає змогу здійснювати часові довгострокове прогнозування регіонального масштабу положення рівня ґрунтових вод для будь-якої території і розглядається як основа для системного проектування і створення ГІС довгострокового прогнозування природного режиму рівнів підземних вод для території України, використання якої передбачається при пошуках та розвідці родовищ підземних вод, визначенні їх запасів, при проектуванні експлуатації підземних вод для водопостачання, при розробці заходів з охорони підземних вод, при проектуванні будівництва та експлуатації споруд, а також при вирішенні завдань моніторингу і прогнозування небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища. Геоінформаційний пілот-проект доцільно розробляти на прикладі територій окремих адміністративних областей, для яких моніторинг і прогнозування гідрогеодинамічного режиму є особливо актуальними.

Впровадження ГІС дозволить систематизувати, зберігати існуючу інформацію та здійснювати її обробку відповідно до встановленого алгоритму, що, в свою чергу, дасть змогу зменшити обсяги польових гідрогеологічних спостережень, скоротити терміни виконання камеральної обробки даних моніторингу рівнів підземних вод і підвищити достовірність довгострокових гідрогеологічних прогнозів.

Необхідно зазначити, що суть планування проекту полягає в розробці та обґрунтуванні цілей, визначенні найкращих методів і способів їх досягнення при ефективному використанні всіх видів ресурсів, необхідних для виконання поставлених завдань, і встановленні їх взаємодії [25].

Від початку розробки ГІС-проекту його плануванням повинні займатися перш за все [16, 17]:

1) ГІС-команда та ГІС-менеджер, який повинен взяти на себе провідну роль у процесі планування і тримати осіб, які ухвалюють

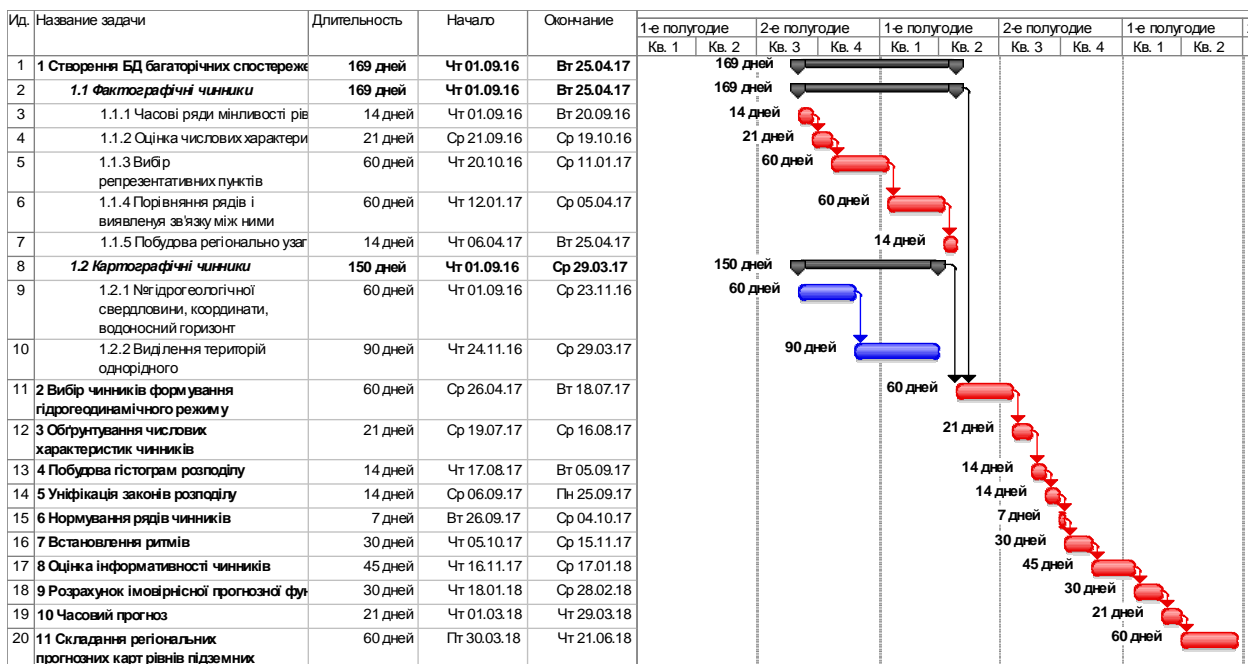


Рисунок 2 – Фрагмент діаграми Ганта ГІС-проекту регіонального гідрогеологічного прогнозування в середовищі Microsoft Project

рішення на вищому рівні, в курсі подій протягом всього процесу;

2) Користувачі, яких слід розглядати як важливу категорію і залучати до процесу планування для вирішення їх реальних потреб;

3) Консультанти, участь яких рекомендована на всіх етапах планування.

Процес планування проекту передбачає визначення цілей і параметрів взаємодії між роботами та учасниками проекту, розподіл ресурсів та вибір і прийняття організаційних, економічних, технологічних рішень для досягнення поставлених цілей проекту. Ефективним інструментом організації процесів планування для великих за обсягом проектів (зокрема, ГІС-проектів) є системи автоматизації управління проектами – програмні системи, які дозволяють автоматизувати одну або декілька складових управління проектами (складання календарного плану робіт, управління ресурсами, витратами, ризиками, якістю тощо). Зазвичай, системи автоматизації управління проектами містять такі структурні елементи [25]:

- засоби для календарно-сіткового планування;
- засоби для розв'язання окремих задач (допроектний аналіз, розробка бізнес-планів, аналіз ризиків, управління контрактами, часом, бюджетом);
- засоби для організації комунікацій між виконавцями проекту.

Системи календарно-сіткового планування забезпечують базовий набір функцій, необхідних для проектування структури робіт проекту, планування ресурсів і витрат, обміну інформацією між учасниками проекту і контролю за ходом його виконання [18].

Середовище програмного пакету Microsoft Project дозволяє скласти список завдань проек-

ту, розділити завдання на підзадачі, задати послідовність їх виконання, призначити ресурси (працівників, обладнання, матеріали, витрати) конкретним завданням проекту, а також визначити вартість виконання всього проекту, виходячи з вартості ресурсів. Календарний план проекту в Microsoft Project складається на підставі введених користувачем даних про проект в цілому, про окремі його елементи (задачі), за необхідності – про ресурси, потрібні для виконання цих задач [25].

За допомогою засобів даного програмного пакету (зокрема відомої діаграми Ганта) відповідно до етапів, передбачених алгоритмом дослідження і прогнозування природного гідрогеодинамічного режиму, розроблено структуру і задано тривалості робіт для створення первинного геoinформаційного забезпечення регіонального гідрогеологічного прогнозування і моделювання (рис. 2).

Слід звернути увагу, що алгоритм підготовки ГІС-проекту до реалізації не є лінійним (рис. 2). Існують етапи, виконання яких може призвести до необхідності повернення до попереднього кроку, наприклад, з метою внесення змін і, можливо, доповнень у результат виконання попередніх етапів. Таким чином, процес підготовки проекту є ітеративним, а окремі завдання – пов'язаними між собою.

Розроблена сіткова модель календарного плану дає змогу ГІС-менеджеру відстежувати план виконання проекту та його зміни, коригувати проектні витрати і ресурсні навантаження, а також одержувати інформацію в згрупованому, узагальненому вигляді.

Загалом на створення і впровадження повноцінної ГІС-моделі за наведеною схемою може піти 1-3 роки. Однак дана схема пріоритетна

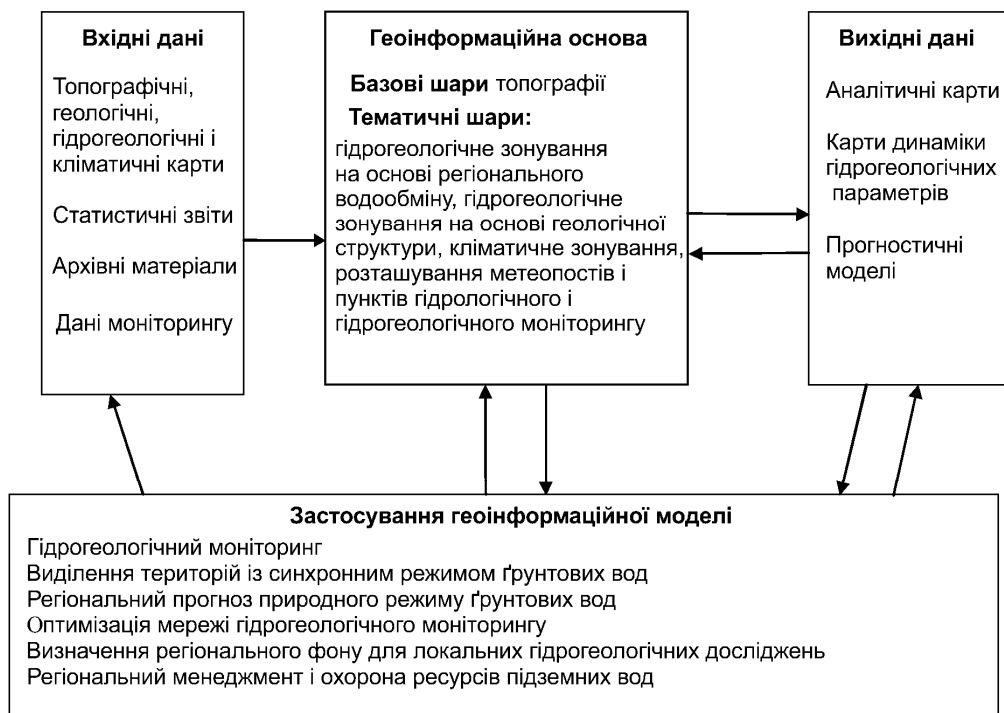


Рисунок 3 – Діаграма проектування і застосування базового геоінформаційного забезпечення в задачах моніторингу підземних вод

тим, що вже є стратегічно впорядкованою і гарантує успішне впровадження результатів.

Метою створення ГІС-моделей є відображення гідрогеологічних умов досліджуваних регіонів для їх вивчення і аналізу, підготовки вхідних даних для математичних моделей, відображення і аналізу результатів моделювання. Геоінформаційна модель дозволяє оптимізувати виконання наступних задач (рис.3):

1) збереження, накопичення і систематизацію результатів режимних спостережень і супутньої гідрогеологічної інформації, що отримується в результаті різнопланових геологічних досліджень;

2) аналізу і моделювання засобами ГІС, збереження і накопичення отриманих результатів;

3) представлення результатів аналізу і прогнозування шляхом побудови картографічних моделей.

Висновки

Отже, проектування аналітичної ГІС довгострокового регіонального прогнозування природного гідрогеодинамічного режиму для території України є актуальною і складною задачею. Важливою передумовою створення успішної системи є розробка концептуальної схеми обробки вхідних даних (результатів спостережень за елементами гідрогеологічного режиму і характеристиками режимоутворювальних чинників), яка повинна включати створення баз картографічних і фактографічних даних, вибір репрезентативних гідрогеологічних пунктів, виділення районів із однорідним режимом, но-

рмалізацію значень часових рядів, визначення основних періодів часових коливань, оцінку синхронно-зміщеної ритмічності мінливості підземних вод і головних режимоутворювальних чинників, розрахунок інтегральних показників і екстраполяцію їх ймовірностей для оцінки прогнозованої забезпеченості рівнів підземних вод досліджуваних територій. Можливості системи автоматизації управління проектами Microsoft Project, зокрема засоби календарно-сіткового планування, дають змогу виконати структурування складного ГІС-проекту і скласти календарний план робіт для подальшого ефективного проектування, тестування, впровадження і експлуатації геоінформаційної системи.

Література

- 1 Альтовский М.Е. Методическое руководство по изучению режима подземных вод / М.Е. Альтовский, А.А. Коноплянцев. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 196 с.
- 2 Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод / Ковалевский В. С. – М.: Недра, 1973. – 152 с.
- 3 Ковалевский В.С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией / Ковалевский В.С. – М.: Недра, 1986. – 198 с.
- 4 Коноплянцев А.А. Естественный режим подземных вод и его закономерности / А.А. Коноплянцев, С.М. Семенов. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 231 с.

- 5 Коноплянцев А.А. Прогноз и картирование режима грунтовых вод / Коноплянцев А.А., Ковалевский В.С., Семенов С.М. – М.: Недра, 1974. – 208 с.
- 6 Рубан С.А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України: монографія / С.А. Рубан, М.А. Шинкаревський. – К.: УкрДГРІ, 2005. – 572 с.
- 7 Прогноз рівнів ґрунтових вод на території України на 2011 рік / [Н.Г. Пишна, О.А. Лихацька, Л.В. Бабіченко та ін.]. – К.: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2010. – 43 с.
- 8 Сарычева Л.В. ГИС в задачах мониторинга уровня грунтовых вод / Л.В. Сарычева, О.А. Логинов // Наукові праці ДонНТУ. – 2009. – Випуск 9(143). – С. 86 – 93.
- 9 Кошляков О.Є. Моніторинг гідрогеодинамічної складової геологічного середовища урбанізованих територій (на основі ГІС): авторефер. дис. на здобуття наук. ступеня. д. геолог. наук: спец. 04.00.05 «Геологічна інформатика» / О.Є. Кошляков. – К., 2011. – 32 с.
- 10 Кошляков О.Є. Застосування геоінформаційного підходу при вивченні динаміки ґрунтових вод на території міст / О. Є. Кошляков // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики : зб. наук. праць. – К., 2009. – С. 241– 246.
- 11 Диняк О.В. Моделювання рівнів ґрунтових вод у долинах малих річок м. Києва із застосуванням геоінформаційних технологій: авторефер. дис. на здобуття наук. ступеня. канд. геолог. наук: спец. 04.00.05 «Геологічна інформатика» / О.В. Диняк. – К., 2009. – 19 с.
- 12 Кошляков О.Є. Перспективи застосування гідрогеологічного моделювання в системі моніторингу надрокористування / О.Є. Кошляков // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2002. – Вип. 24. – С. 80 – 82.
- 13 Вижва С.А. Досвід застосування геоінформаційних технологій при створенні системи моніторингу за станом геологічного середовища на території Київської агломерації / С.А. Вижва, О.Є. Кошляков, О.М. Кожан // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2006. – Вип. 38. – С. 4 – 7.
- 14 Мокієнко В.І. До питання побудови геоінформаційних гідрогеологічних моделей / В.І. Мокієнко, О.Є. Кошляков // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. – 2008. – Вип. 43. – С. 49 – 52.
- 15 Моделирование водных ресурсов бассейна Аральского моря для обеспечения населения качественной питьевой водой [Электронный ресурс] / Веселов В.В., Трушель Л.Ю., Калмыкова Н.В. [и др.] // Режим доступа: <http://www.aralmodel.unesco.kz>
- 16 Де Мерс, Майкл Н. Географические информационные системы: пер. с англ. – М.: Дата+, 1999. – 489 с.
- 17 Tomlinson R. Thinking About GIS: Geographic Information System Planning for Managers. – ESRI Press, 2003. – 240 с.
- 18 Maguire D. The Business Benefits of GIS: An ROI Approach. – ESRI Press, 2008. – 256 с.
- 19 Рабочая книга по прогнозированию / [под ред. И.В. Бестужев-Лада]. – М.: Мысль, 1982. – 430 с.
- 20 Кендэл М. Временные ряды / [пер. с англ. Ю.П. Лукашина]. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 199 с.
- 21 Давибіда Л.І. Довгостроковий регіональний прогноз і картування природного режиму рівнів ґрунтових вод (на прикладі територій окремих адміністративних областей) / Л.І. Давибіда // Науковий вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія «Геологія» – 2012. – Вип. 56. – С.45-48.
- 22 Кузьменко Э.Д. Универсальный алгоритм прогнозирования экзогенных геологических процессов / Э.Д. Кузьменко // Матеріали VIII Міжнар. наук. конф. «Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища». – К.: КНУ ім. Т. Шевченка, 2007. – С. 16–17.
- 23 Закономерная связь между величинами вероятностей возникновения и оползневой опасности при комплексном воздействии природно-техногенных факторов. Научное открытие. Диплом № 310/ Кузьменко Э.Д., Крыжановский Е.И., Карпенко А.Н., Журавель А.М. // Научные открытия: Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез-2006. – Москва: МААНОИ, 2007. – С. 64-65.
- 24 Тарасюк Г.М. Управління проектами: навч. посібник.; 3-є вид. – К.: Каравела, 2009. – 320 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
19.10.16*

*Рекомендована до друку
професором **Кузьменком Е.Д.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Лазаровичем І.М.**
(Прикарпатський національний університет
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*